

首都大学オープンユニバーシティ

2017年5月20日

ニュートリノ物理学へのいざない

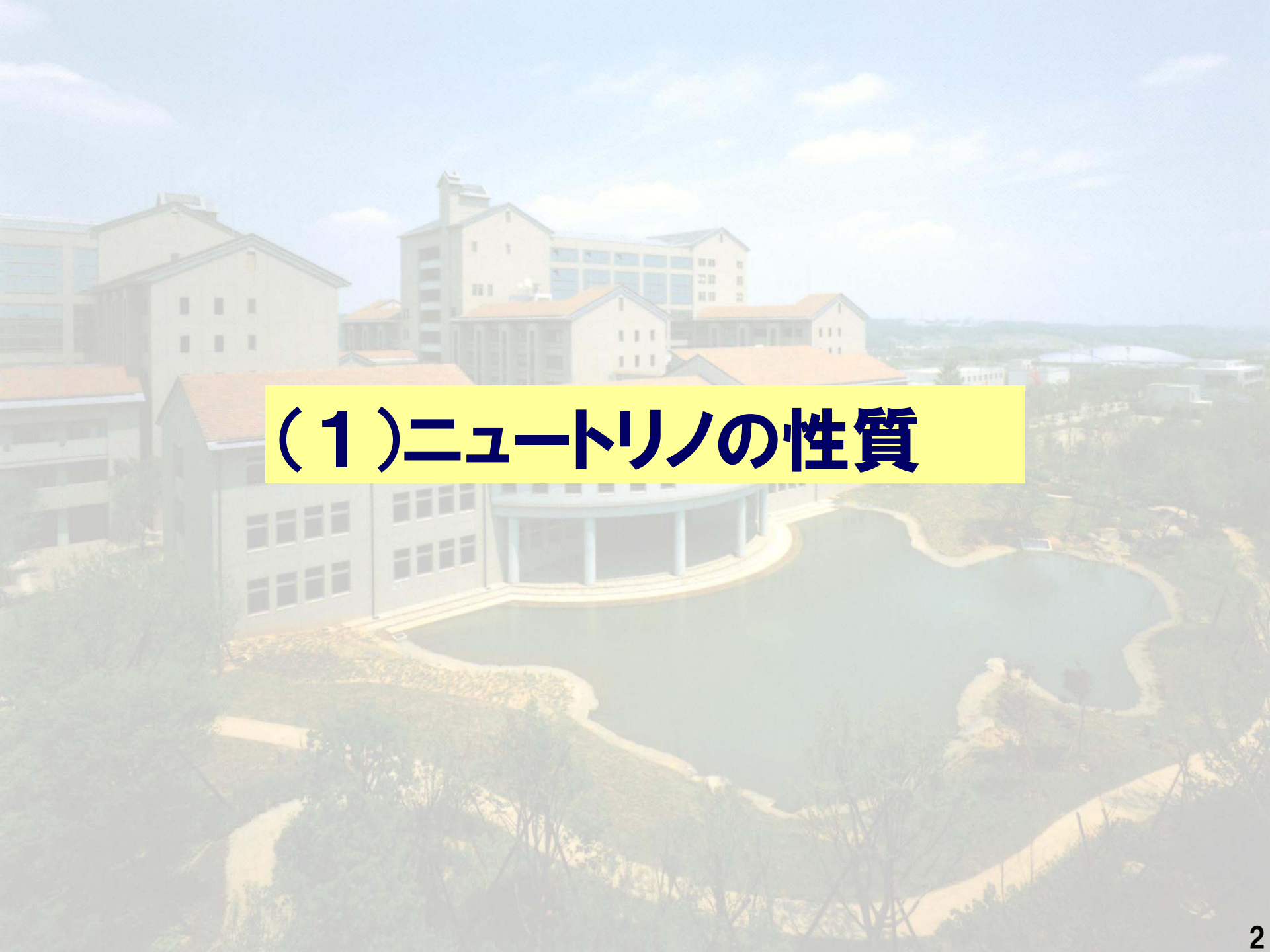
第二回

ニュートリノと素粒子物理学

このスライドは以下この講義のHPに置いてあります：
<http://musashi.phys.se.tmu.ac.jp/~yasuda/ou-2017/>

**首都大学東京・理工学研究科・物理学専攻
素粒子理論研究室 安田修**



An aerial photograph of a university campus. In the foreground, there is a large, irregularly shaped pond with a light-colored path winding around its edge. Behind the pond, several modern, multi-story buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible. The sky is blue with scattered white clouds. A yellow rectangular box is overlaid on the image, containing the text '(1)ニュートリノの性質' in bold black characters.

(1)ニュートリノの性質

[復習] ニュートリノに働く力

素粒子		強い相 相互作用	電磁相 相互作用	弱い相 相互作用	重力相 相互作用
クォーク	u	○	○	○	○
	d	○	○	○	○
レプトン	e	×	○	○	○
	ν_e	×	×	○	○

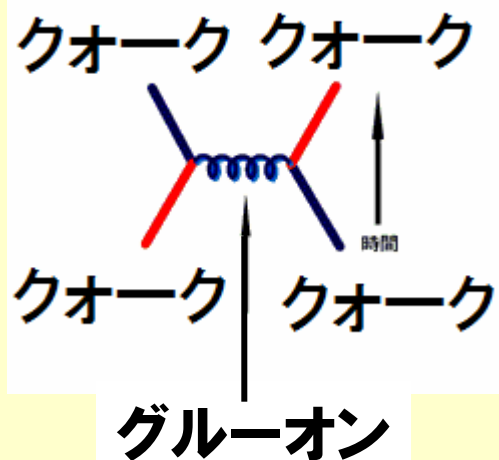
(重力を除くと)ニュートリノは弱い力しか感じない

→観測はものすごく難しい

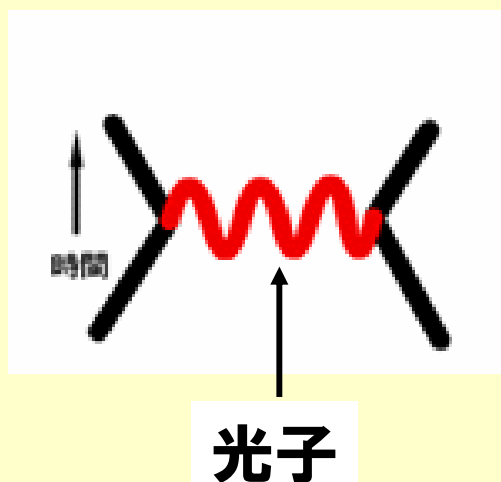
自然界の4つの相互作用(力): 媒介粒子のキャッチボール

相互作用	強い相互作用	電磁相互作用	弱い相互作用	重力相互作用
相互作用の媒介粒子	グルーオン	光子	W,Zボゾン	重力子
相互作用の大きさ	1	10^{-2}	10^{-5}	10^{-40}

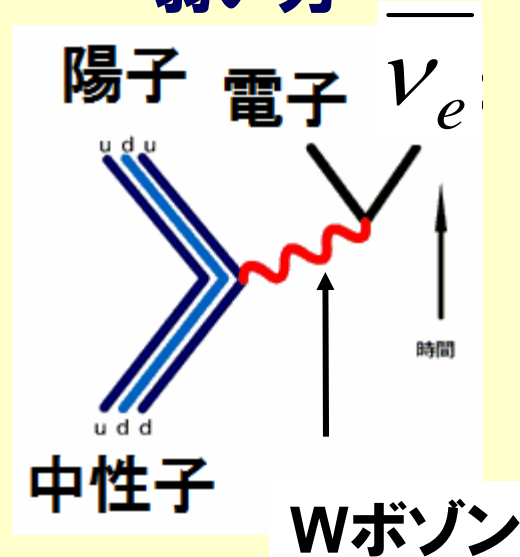
強い力



電磁気力



弱い力



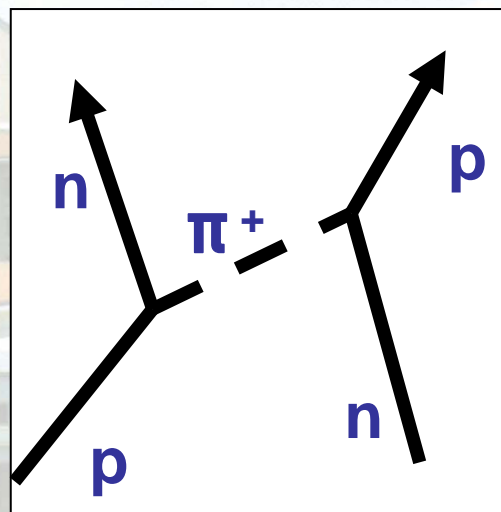
標準模型

素粒子間の相互作用

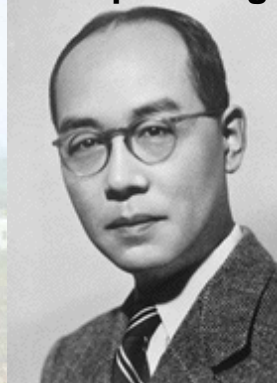
素粒子論における力（＝相互作用）の記述

湯川の中間子論

相互作用(核力)は
粒子(π 中間子)を
媒介して起こる



nobelprize.org



湯川秀樹

この湯川の中間子論は素粒子論における相互作用の
基本的な考え方として現在まで引き継がれている:

中間子論 媒介粒子 = π 中間子

標準模型 媒介粒子 = グルーオン、光子、W・Zボゾン

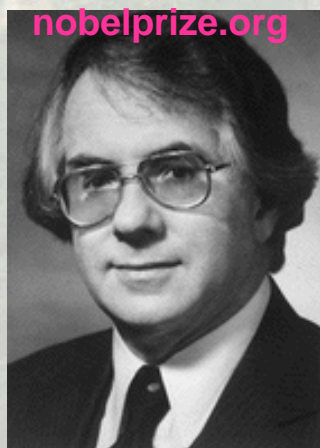
弱い相互作用

弱い力 = W, Z 粒子の交換

例: ベータ崩壊(中性子、原子核の崩壊(原子力発電))、地熱

$$d \rightarrow u + W^-, e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + W^-$$

$d \rightarrow d + Z, \nu_e \rightarrow \nu_e + Z$ などの反応の組み合わせ



グラショウ

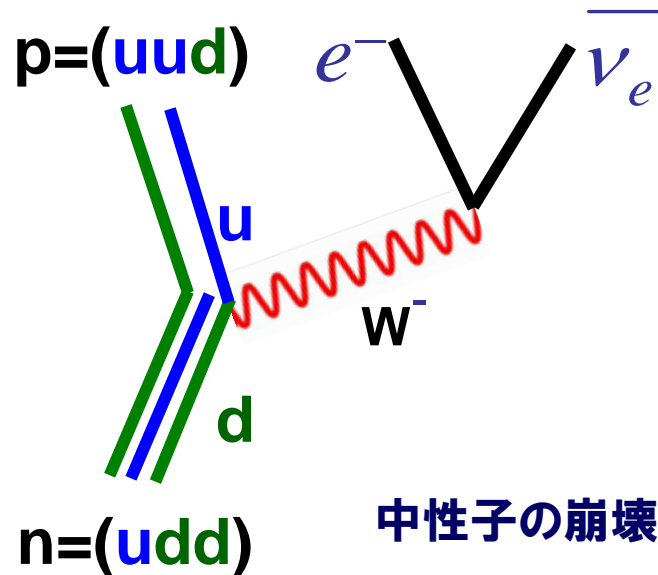


サラム

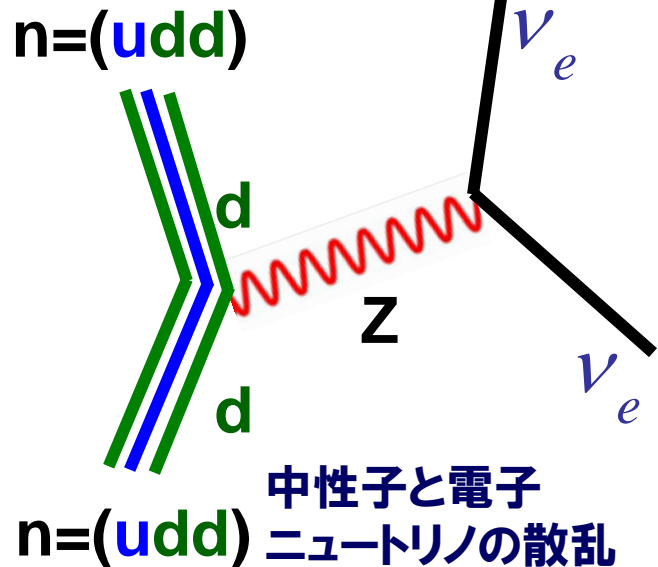


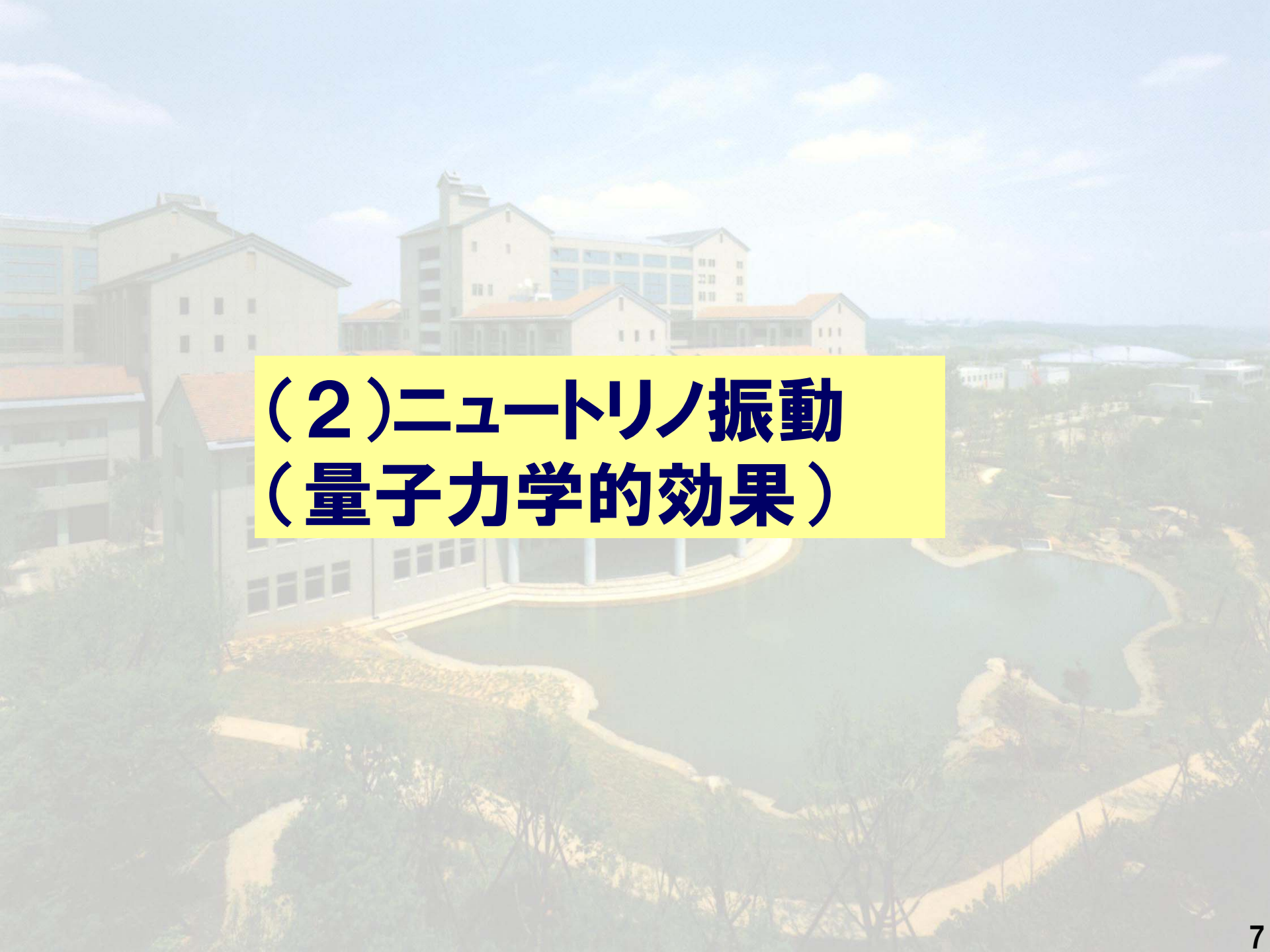
ワインバーグ

荷電カレントの弱い相互作用



中性カレントの弱い相互作用



An aerial photograph of a university campus. In the foreground, there is a large, irregularly shaped pond surrounded by a paved walkway and greenery. In the background, several multi-story university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible under a blue sky with scattered white clouds.

(2)ニュートリノ振動 (量子力学的効果)

ニュートリノの質量と混合

ニュートリノに質量と混合がある場合には、ニュートリノの飛行中、一つの種類のニュートリノから別な種類のニュートリノに変換する可能性が存在することがずっと以前から、知られていた(ニュートリノ振動と呼ばれる現象):

1957年

ポンテコルボ

$$\nu \Leftrightarrow \bar{\nu}$$

1962年

牧—中川—坂田

$$\nu_e \Leftrightarrow \nu_\mu$$

pontecorvo.jinr.ru



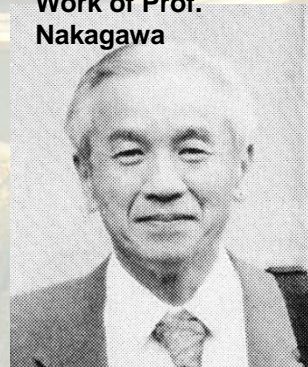
ポンテコルボ

www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~sg/



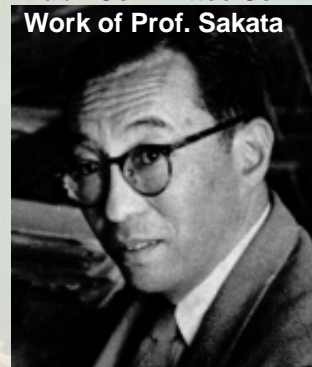
牧二郎

Publ. Committee Sci.
Work of Prof.
Nakagawa



中川昌美

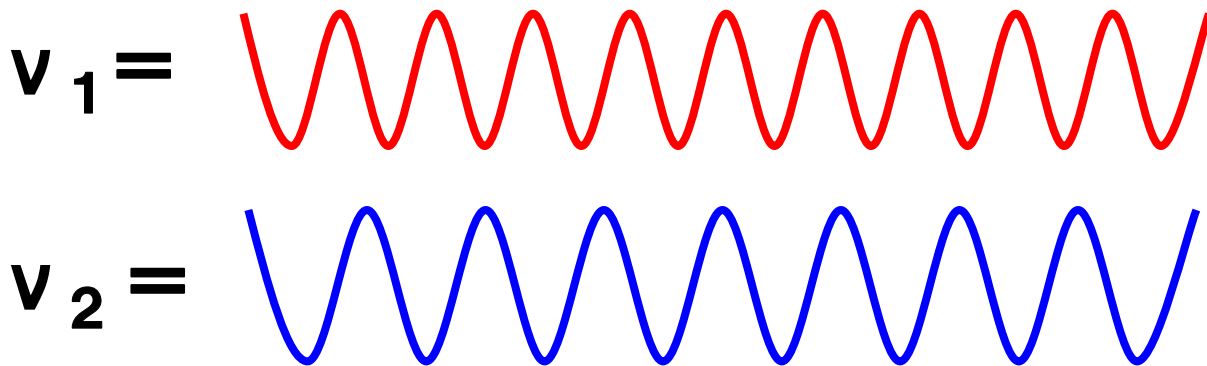
Publ. Committee Sci.
Work of Prof. Sakata



坂田昌一

ニュートリノの種類の変換(2世代の場合)

質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2 (質量 m_1, m_2) の波は波長が微妙に異なる:



種類が違うニュートリノの状態 ν_e, ν_μ は質量の固有状態 ν_1, ν_2 (質量 m_1, m_2) の組み合わせで表せる:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \nu_1 \cos \theta + \nu_2 \sin \theta \\ -\nu_1 \sin \theta + \nu_2 \cos \theta \end{pmatrix}$$

真空中のニュートリノ振動

エネルギーEのニュートリノが距離Lだけ走る間に ν_μ から ν_e に変換される確率は

$$\sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{(\Delta m^2 / \text{eV}^2) (L / \text{km})}{E / \text{GeV}} \right)$$

となり、Lについて振動的振る舞いを示す

これが1程度になる時にニュートリノが変換される確率が大

2つの波の差が最大となる距離Lは

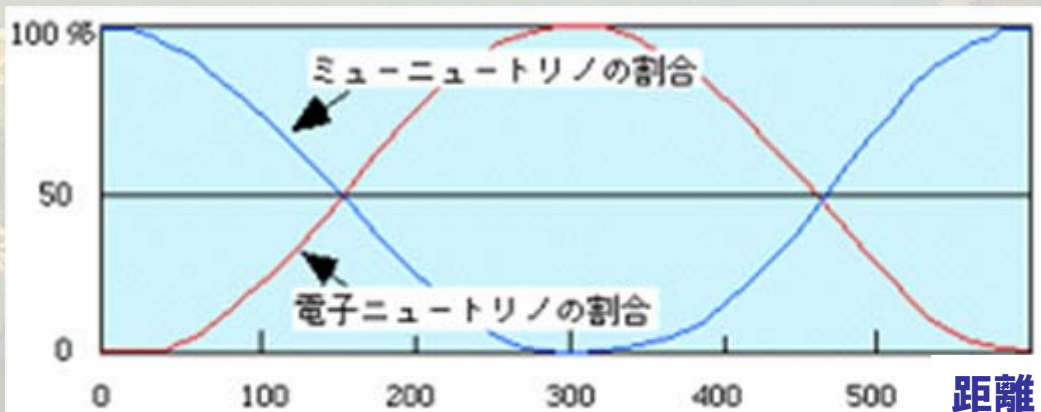
住吉先生の話 (第3回目)

$\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, $E = 0.6 \text{GeV} \rightarrow L = \text{約} 300 \text{km}$ (T2K実験)

$\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, $E = 4 \text{MeV} \rightarrow L = \text{約} 2 \text{km}$ (ダブルシヨ一実験)

$\Delta m^2 \equiv m_2^2 - m_1^2$ は質量の二乗の差であり、質量そのものではない

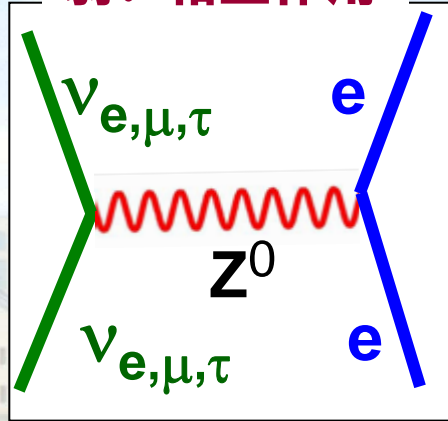
実験からは、 θ と Δm^2 のみができる



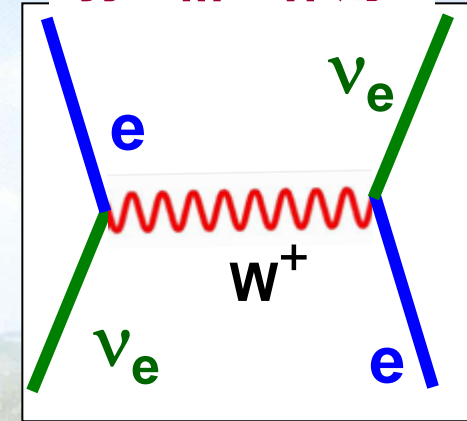
物質中のニュートリノ振動

ν_e のみが物質中の電子と余分な相互作用をするためにニュートリノ振動の確率は修正を受ける

中性カレントの弱い相互作用



荷電カレントの弱い相互作用



真空中の確率

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta E L}{2} \right)$$

$$\Delta E \equiv \frac{\Delta m^2}{2E} \equiv \frac{m_2^2 - m_1^2}{2E}$$

物質中の確率

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\tilde{\theta} \sin^2 \left(\frac{\Delta \tilde{E} L}{2} \right)$$

θ : 真空中の混合角

$\tilde{\theta}$: 物質中の混合角

$$\tan 2\tilde{\theta} \equiv \frac{\Delta E \sin 2\theta}{\Delta E \cos 2\theta - A}$$

$A = (\rho/3\text{gcm}^{-3})10^{-13}\text{eV}$; ρ =物質密度; 反 ν の場合には $A \rightarrow -A$

$$\Delta \tilde{E} \equiv \left[(\Delta E \cos 2\theta - A)^2 + (\Delta E \sin 2\theta)^2 \right]^{1/2}$$

ニュートリノ質量研究の重要性

ニュートリノの質量は**標準模型**では0だと仮定されている
→ニュートリノ質量は**標準模型**を超える物理の研究に役立つ

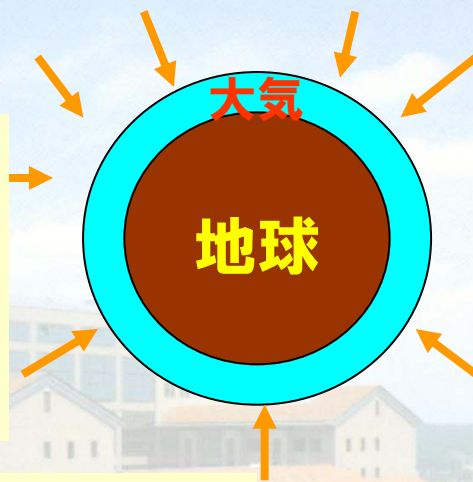
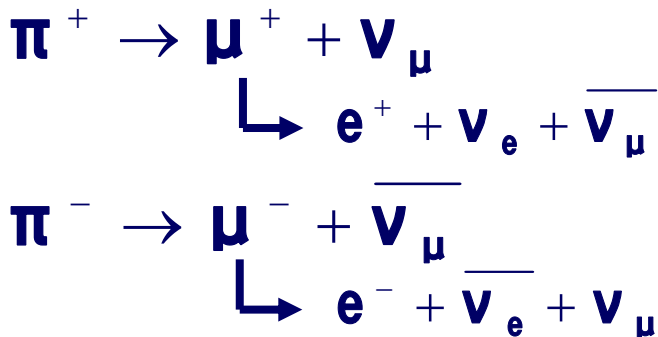
An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, irregularly shaped pond is surrounded by a paved walkway and greenery. Behind the pond, several modern, multi-story buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible. The sky is blue with scattered white clouds. A yellow banner with black text is overlaid on the middle of the image.

(3)大気ニュートリノの話

大気ニュートリノ

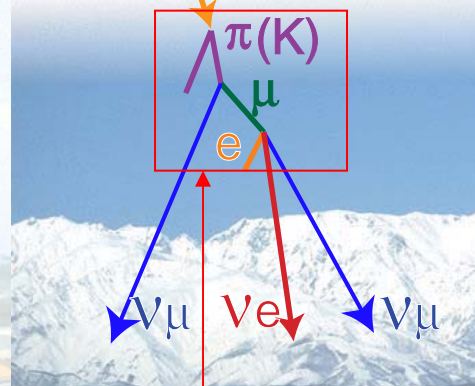
地球には宇宙から1次宇宙線
がつねに降り注いでいる→それ
らが大気中の核子と衝突して
2次宇宙線が生成される

ほとんどの粒子は π^\pm 中間子となる
→ π^\pm はミュー粒子 μ^\pm に崩壊
→ μ^\pm は(陽)電子・ニュートリノへと崩壊
→これらの過程で生成されたニュートリノ
を**大気ニュートリノ**と呼ぶ。



1次宇宙線 (陽子、ヘリウム)

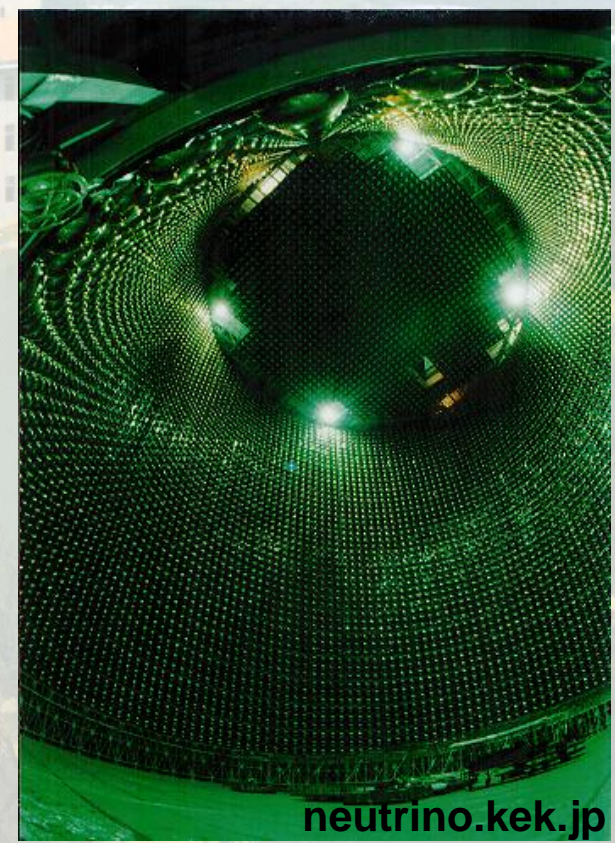
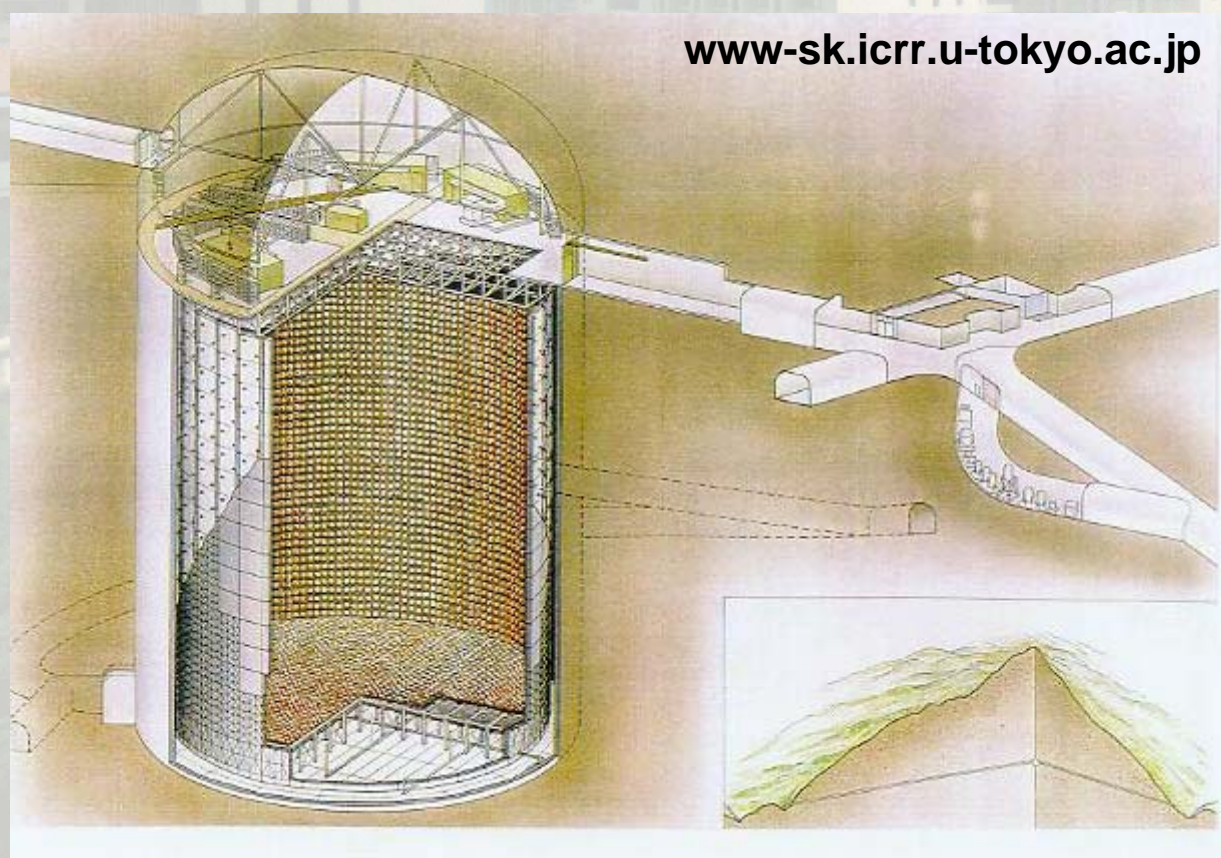
p, He, \dots



2次宇宙線 (μ^\pm, e^\pm)

スーパーカミオカンデ(1995～、岐阜県神岡)

- 水(50kt)による測定器(標的が経済的であるだけでなく、チェレンコフ光による荷電粒子の観測が可能となり、一石二鳥)
- 地下(約1km)の実験施設(バックグラウンドを減らすため)



大気ニュートリノ欠損の観測

粒子と反粒子の違いを無視すれば

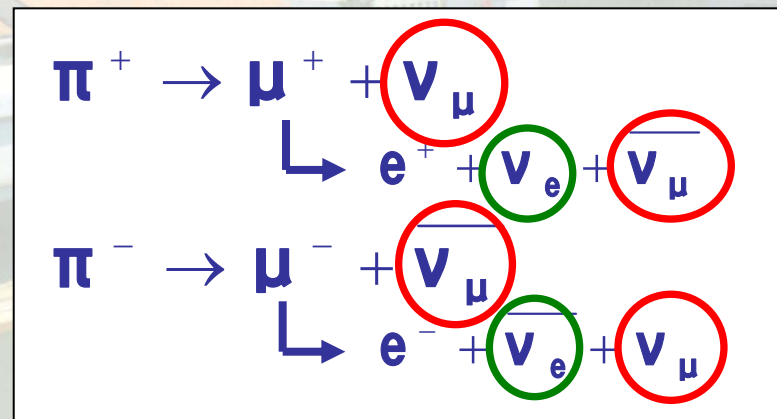
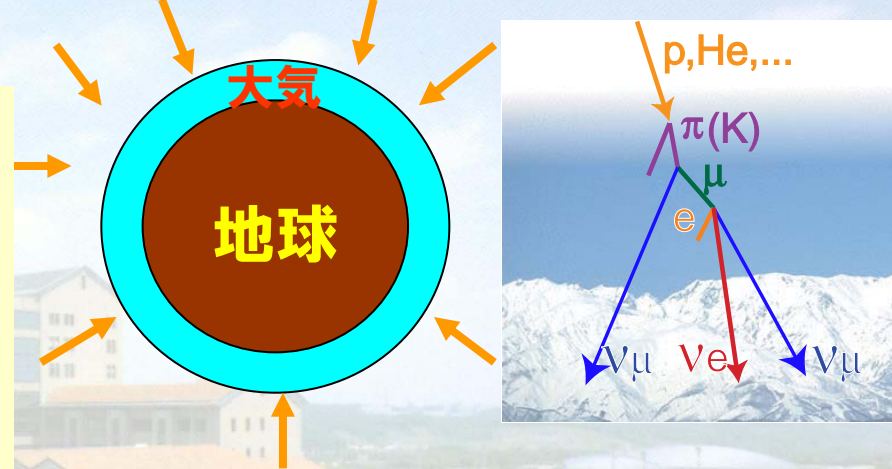
$$(\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}) : (\nu_e + \bar{\nu}_e) = 2 : 1$$

となるはずであるが、観測結果は

$$(\nu_{\mu} + \bar{\nu}_{\mu}) : (\nu_e + \bar{\nu}_e) = 1.3 : 1$$

となって理論と食い違っていることが実験的に示された(スーパーカミオカンデ、1998年)。

1次宇宙線(陽子、ヘリウム)



大気ニュートリノ欠損の原因

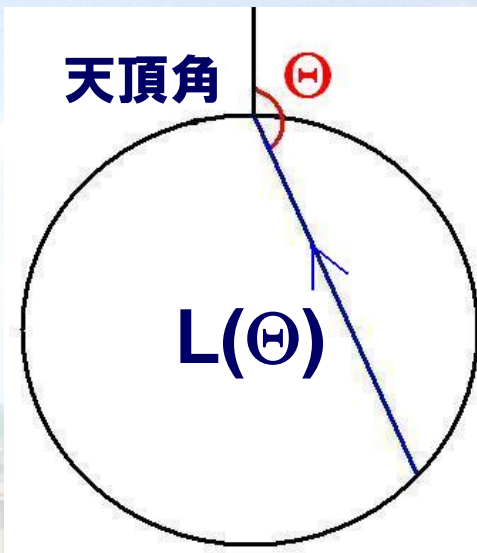
結論から言うと、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ の転換で
 ν_μ の量が減っているのが大気ニュート
リノ欠損の原因

$$(\nu_\mu + \bar{\nu}_\mu) : (\nu_e + \bar{\nu}_e)$$

の実験値はLとEに依存し、ニュート
リノ振動の公式

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$

通りになっていることがスーパーカミ
オカンデにより1998年に実験的に
証明された。



www2.kek.jp



戸塚洋二

nobelprize.org



梶田隆章

The background image shows a university campus with several multi-story buildings, a large pond in the foreground, and a clear blue sky with some clouds. The text is overlaid on a yellow rectangular background.

(4) 加速器ニュートリノによる 大気ニュートリノ観測の追試

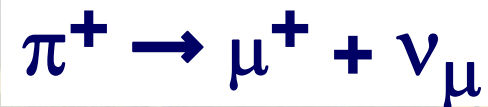
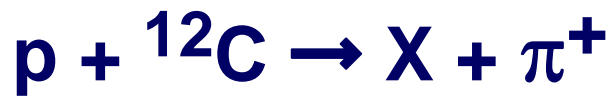
●人工的ニュートリノによる実験の必要性

大気ニュートリノは厳密に言うとどこで生成されたかは正確には不明(実験的な誤差が出てくる)
→人工的なニュートリノによる実験が望ましい
→大気ニュートリノと同程度のエネルギーのニュートリノは加速器ニュートリノのみ

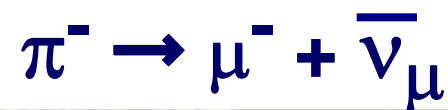
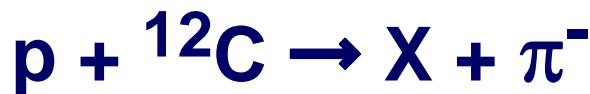
●加速器ニュートリノ生成の原理



ν_{μ} ビーム



$\bar{\nu}_{\mu}$ ビーム

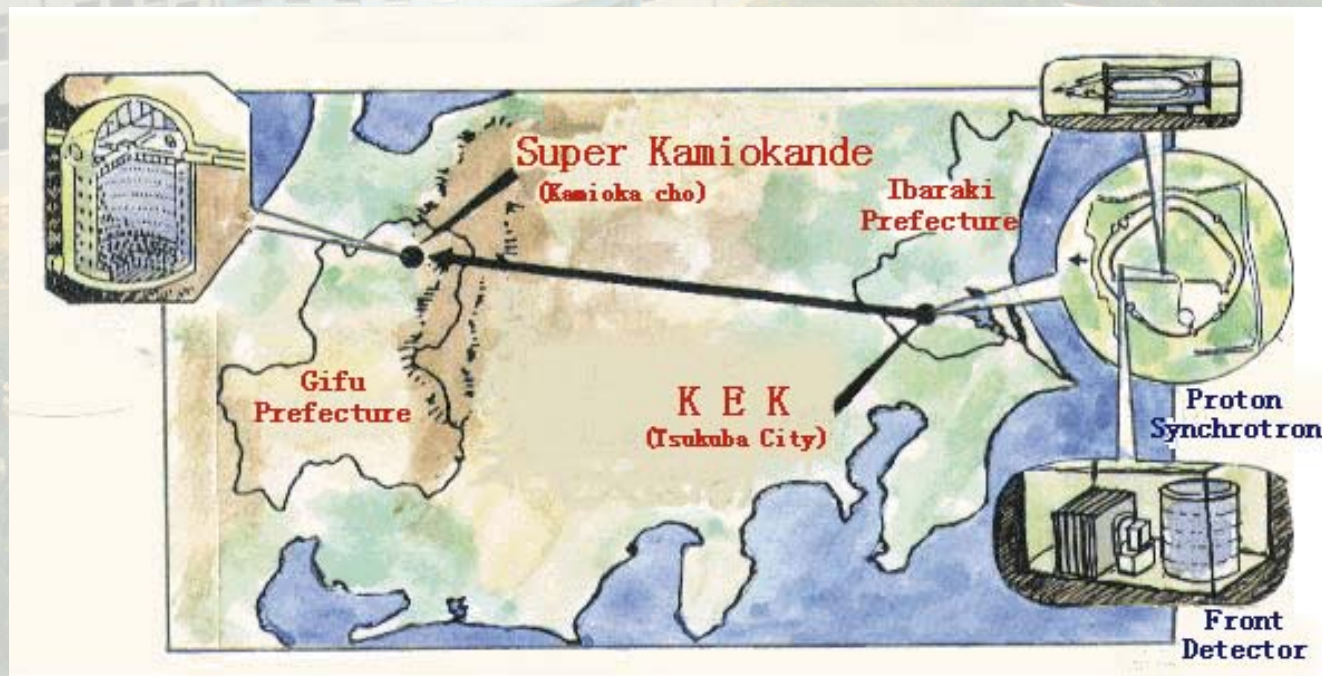


K2K (KEK To Kamioka; 1999~2004、加速器ニュートリノ欠損)

- 高エネルギー研究機構(筑波)→スーパーカミオカンデ(神岡)
- 人工的なニュートリノ(ν_{μ})が距離250kmでどれだけ別なニュートリノに変換しているかを測定(世界初)
- 大気ニュートリノ欠損がニュートリノ振動によるならば、SKにおける人工ニュートリノ(ν_{μ})の観測量も減っているはず
→その結果はスーパーカミオカンデの大気ニュートリノの結果と一致



西川公一郎

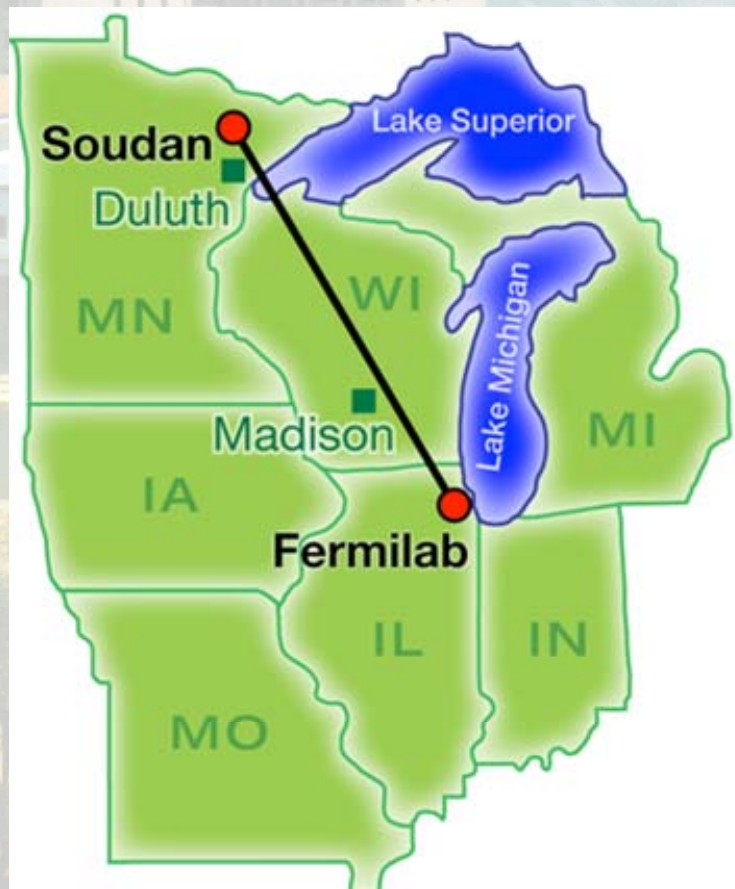
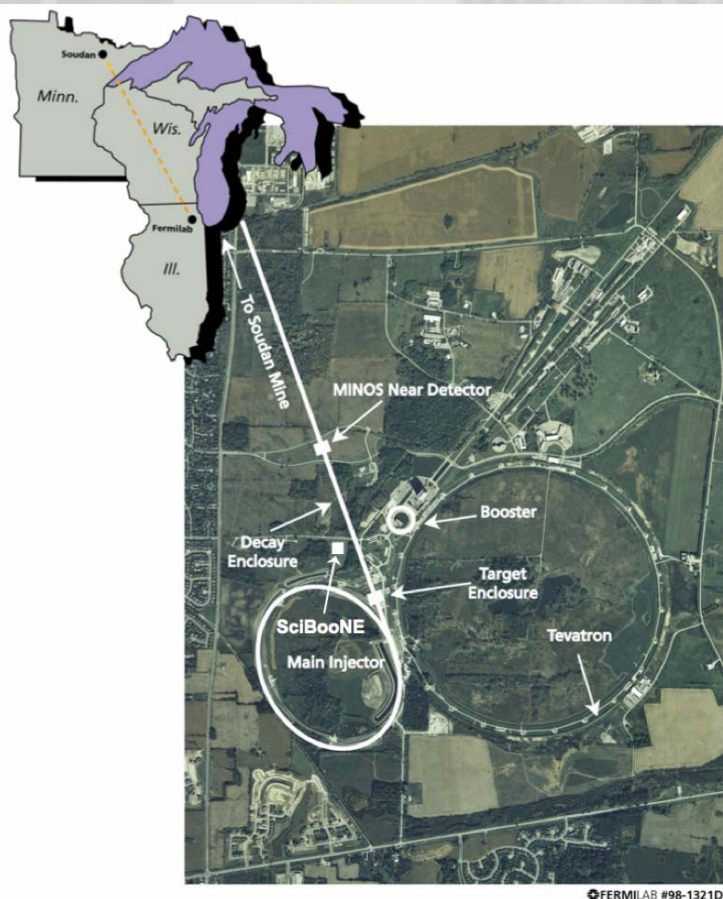


MINOS (2005~2012; 加速器ニュートリノ欠損)

- FNAL→Soudan(米国ミネソタ州)
- $L=735\text{km}$ で $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$ と $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu}$ を測定
- その結果はSKの大気ニュートリノの結果と一致



ウォジツキ

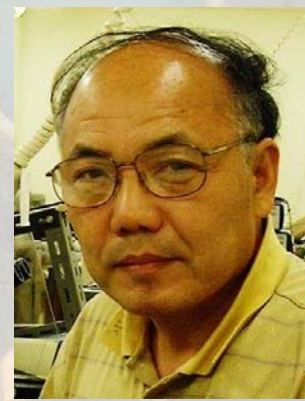


OPERA (2010~ 2012; 加速器 ニュートリノ転換)

- CERN→Gran Sasso(伊)
- $L=730\text{km}$ で $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\tau}$ を測定
- τ 粒子を観測するには τ 粒子(質量 1.8GeV)を作れるほどニュートリノのエネルギーを高くする必要がある
→ OPERAでのニュートリノの平均エネルギー= 20GeV
- τ 粒子はアツという間に崩壊するので、その測定は非常に難しい
→ 測定器は原子核乾板(名大製)
- 現在までに τ のイベントが5発発見されている



デウクレ



丹羽公雄

ニュートリノ観測とニュートリノ欠損/ニュートリノ転換

ニュートリノ振動現象 $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ ($\alpha, \beta = e, \mu, \tau$) の観測には、同じ種類にとどまるモード $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\alpha$ (ニュートリノ欠損; disappearance) の観測と異なる種類に変換するモード $\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta$ ($\alpha \neq \beta$) (ニュートリノ転換; appearance) の観測がある。

ニュートリノ欠損: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$ 低エネルギーではこれが主な測定可能モード


OPERA以外の加速器 ν ($E \approx 1\text{GeV} < m(\tau)c^2$)

$\nu_e \rightarrow \nu_e$ 低エネルギーではこれが唯一の測定可能モード

太陽 ν ・ 原子炉 ν ($E < \text{数MeV} < m(\mu)c^2$)

ニュートリノ転換: $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ 高エネルギービームが必要 (OPERA) ・ τ の測定は至難の業

$\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ このモードは実験的に最も観測が容易だが、この過程の確率自体が小さいので観測が難しい

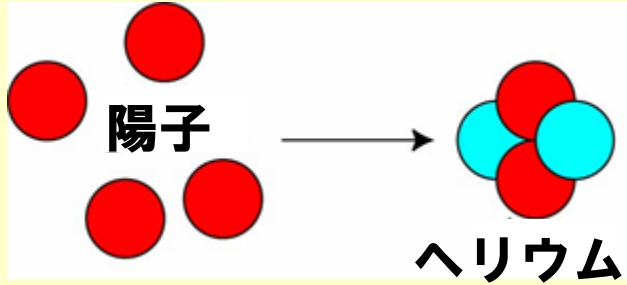
An aerial photograph of a university campus. In the foreground, a large, irregularly shaped pond is surrounded by a paved walkway and greenery. Behind the pond, several multi-story university buildings with light-colored facades and red-tiled roofs are visible. The sky is blue with scattered white clouds. A yellow rectangular box is overlaid on the center of the image, containing the title text.

(5)太陽ニュートリノの話

● 太陽中の反応

弱い相互作用による反応を含む

太陽中では核融合反応



+ 2 陽電子 + 2 電子ニュートリノ

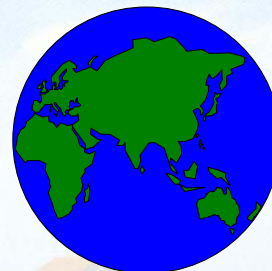
+ 26.7MeV (運動エネルギー = 熱エネルギー)

がつねに起こっていて**エネルギー**が発生している。この反応で発生する**電子ニュートリノ**を**太陽ニュートリノ**と呼ぶ

太陽ニュートリノ欠損の観測



電子ニュートリノ



●太陽ニュートリノは、1970年頃からデイビスが米国サウスダコタ州にあるホームステークで行ってきた実験で観測されていたが、実験値は理論値の約1/2以下であることが長年にわたり知られていた。これを**太陽ニュートリノ問題**と呼ぶ。



デイビス

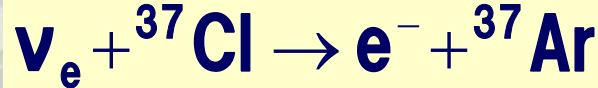
結論から言うと $\nu_e \rightarrow \nu_\mu + \nu_\tau$ の転換により ν_e の量が減っているのが太陽ニュートリノ欠損の原因

2000年頃までの太陽ニュートリノの観測

- 太陽ニュートリノは低エネルギー(<10MeV)なので、ミュー粒子 ($mc^2=106\text{MeV}$) やタウ粒子 ($mc^2=1777\text{MeV}$) を生成することはできず、 ν_e がどれだけ減ったかしか測定できない。
- 太陽ニュートリノのフラックスの予言値には理論的不定性があり、ニュートリノ振動が原因で減っているのかどうか、本当の所はわからない。

Homestake(米)

1968年

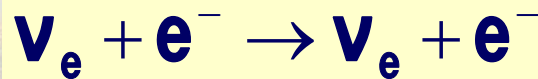


放射化学的測定

$E \geq 0.8\text{MeV}$

Kamiokande (日)

1989年



水チェレンコフ

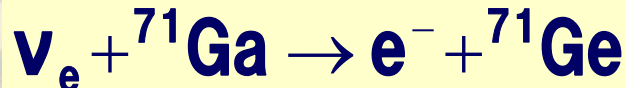
$E > 5\text{MeV}$

Superkamiokande (日)

1998年

GALLEX (伊)

1998年



放射化学的測定

$E \geq 0.2\text{MeV}$

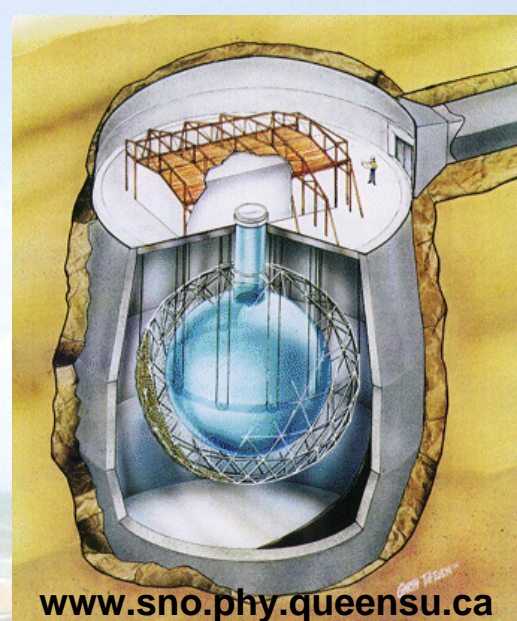
SAGE (露)

1999年

SNO (Sudbury Neutrino Observatory、カナダ オンタリオ州サドベリー市クレイトン鉱山、1999 ～2006)

D_2O , $d = (pn)$, 重陽子

- **重水(1kt)**による測定器(カナダには重水炉が複数箇所あり、高価な重水(～100円/g)が豊富→カナダ原子力公社から1ktを無償で借用)
- **地下(約2km)の実験施設(バックグラウンドを減らすため)**



nobelprize.org



マクドナルド

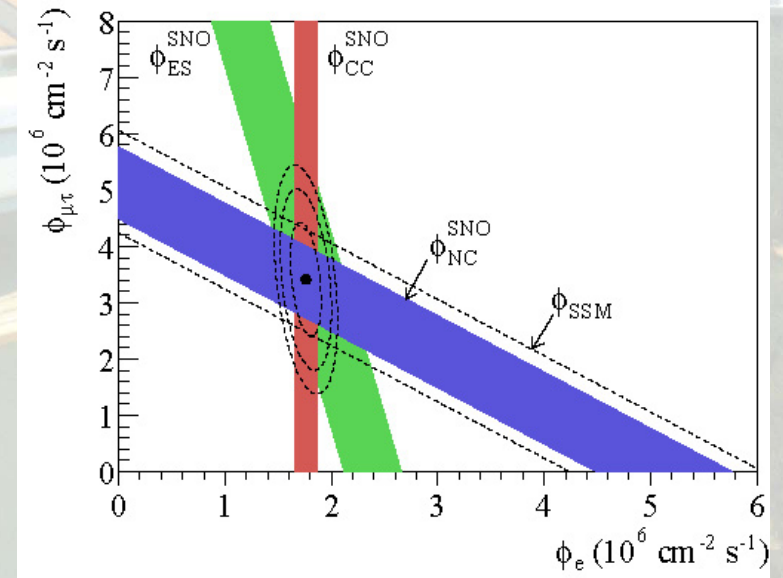
SNOでは次の2つの反応を観測することができる[d=(pn)]:

$\nu_e + d \rightarrow p + p + e^- \rightarrow \nu_e$ のみ可能 $\rightarrow \nu_e$ のみのfluxが測定可能

$\nu_x + d \rightarrow p + n + \nu_x \rightarrow \nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ の全部可能 $\rightarrow \nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ のfluxが測定可能
 $x=e, \mu, \tau$

これら2つの反応を比較した結果、
 $\nu_e + \nu_\mu + \nu_\tau$ は理論値通りで、
 ν_e の量が減っていることが示された(2002年4月19日)

\rightarrow ニュートリノ振動の証拠



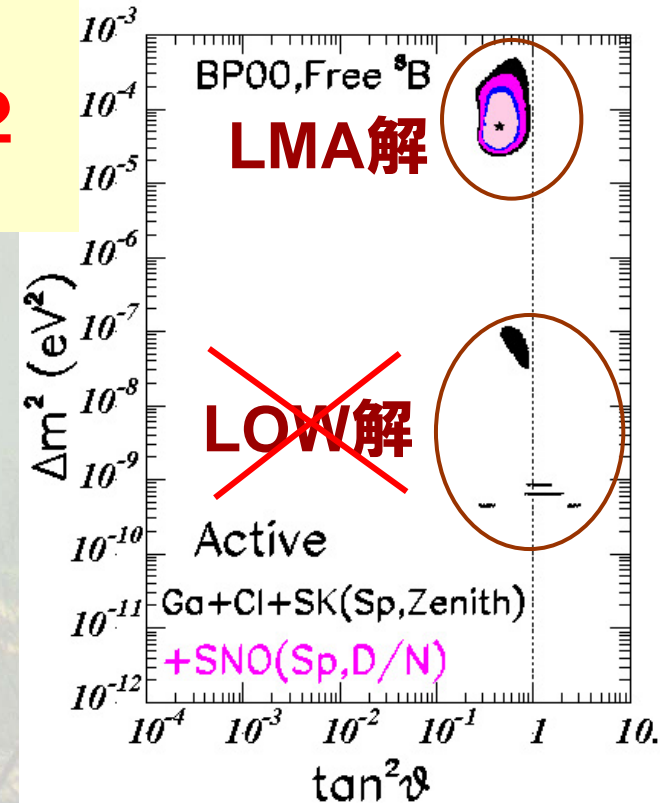
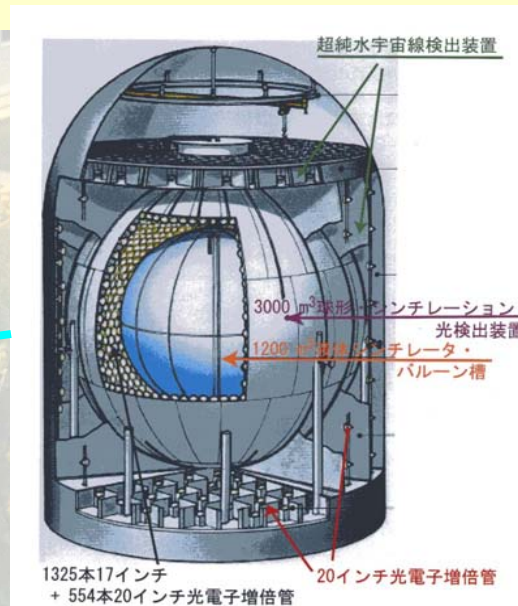
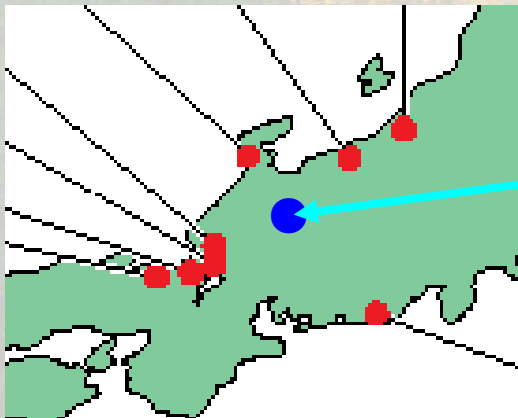
カムランド(原子炉ニュートリノ欠損, 2002 ~)



鈴木厚人

- 液体シンチレーターによる測定器
- 各地にある原発(平均距離200km)から来る反電子ニュートリノを検出
- 原子炉ニュートリノの欠損を発見(世界初)
- その結果は太陽ニュートリノのLMA解と一致し

(SNOが排除できなかったLOW解を排除)、
太陽ニュートリノ問題を最終的に解決(2002年12月6日)



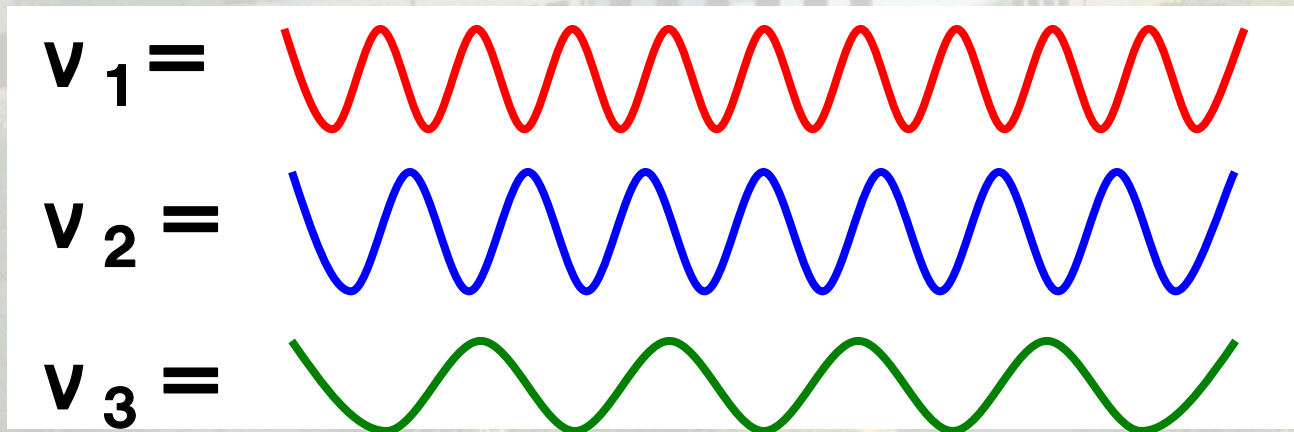


(6)三番目の混合角 θ_{13} の測定

ニュートリノの種類の変換(3世代の場合)

実際にはニュートリノには3世代ある→3種類の質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2, ν_3 (質量 m_1, m_2, m_3) が必要

質量の違うニュートリノの状態 ν_1, ν_2, ν_3 (質量 m_1, m_2, m_3) の波は波長が微妙に異なる:



三世代ニュートリノの混合

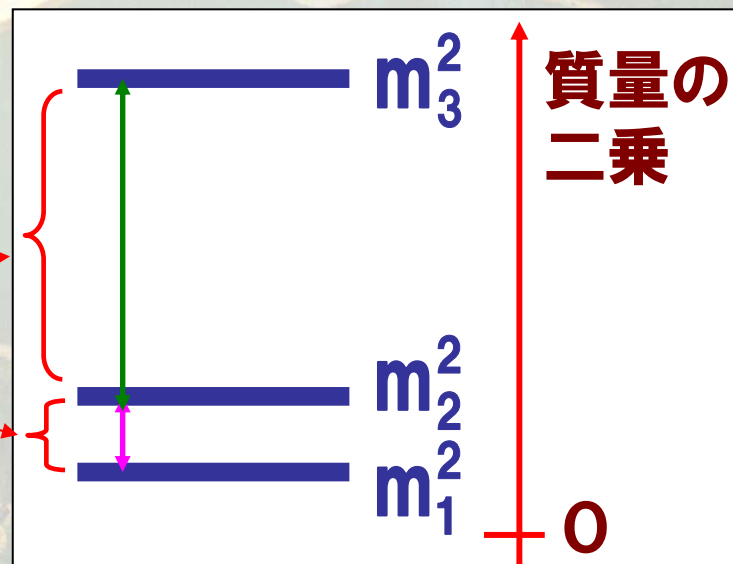
混合行列は**牧・中川・坂田行列**と呼ばれる

実際にはニュートリノには3世代あるので、クォークのカビーボ・小林・益川混合と同様に

$$\begin{pmatrix} \mathbf{v}_e \\ \mathbf{v}_\mu \\ \mathbf{v}_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{e1}\mathbf{v}_1 + \mathbf{U}_{e2}\mathbf{v}_2 + \mathbf{U}_{e3}\mathbf{v}_3 \\ \mathbf{U}_{\mu1}\mathbf{v}_1 + \mathbf{U}_{\mu2}\mathbf{v}_2 + \mathbf{U}_{\mu3}\mathbf{v}_3 \\ \mathbf{U}_{\tau1}\mathbf{v}_1 + \mathbf{U}_{\tau2}\mathbf{v}_2 + \mathbf{U}_{\tau3}\mathbf{v}_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{U}_{e1} & \mathbf{U}_{e2} & \mathbf{U}_{e3} \\ \mathbf{U}_{\mu1} & \mathbf{U}_{\mu2} & \mathbf{U}_{\mu3} \\ \mathbf{U}_{\tau1} & \mathbf{U}_{\tau2} & \mathbf{U}_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{v}_1 \\ \mathbf{v}_2 \\ \mathbf{v}_3 \end{pmatrix}$$

のような3状態を導入して議論するので、確率は複雑になる

最終的に求めるものは**牧・中川・坂田行列**のパラメーター4個と質量の二乗の差2個



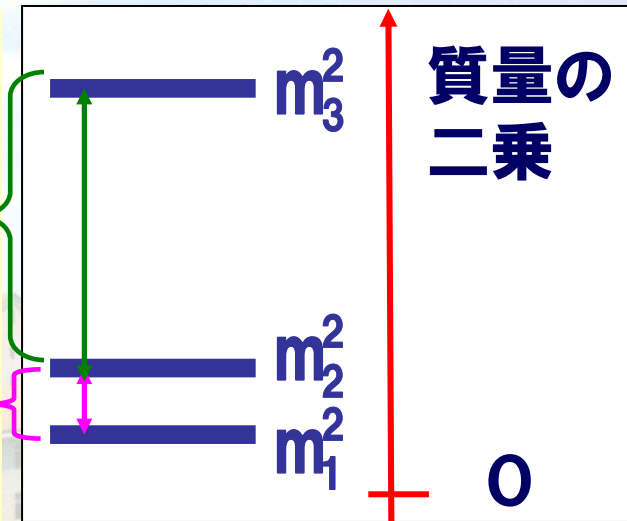
ここまでのニュートリノ振動の話でわかった事

● 大気ニュートリノ・加速器ニュートリノ⇒

$$\theta(\text{大気}) \simeq 45^\circ, \quad |\Delta m_{32}^2| = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2$$

● 太陽ニュートリノ・カムランド⇒

$$\theta(\text{太陽}) \simeq 30^\circ, \quad \Delta m_{21}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2$$



数学的には 3×3 の行列には3つの混合角があることが知られている:

$\theta(\text{太陽}) \Rightarrow \theta_{12}$ と呼ばれる角度

$\theta(\text{大気}) \Rightarrow \theta_{23}$ と呼ばれる角度

$\theta(?) \Rightarrow \theta_{13}$ と呼ばれる角度

この時点でわかっていない量

θ_{13} が測定できる実験

先行研究で θ_{13} は小さな値であることが知られていたため、
いずれの観測も難しいことは予想されていた

● 加速器ニュートリノ転換 T2K(日)

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$$

$$\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2, E = 0.6 \text{GeV} \rightarrow L = \text{約} 300 \text{km}$$

● 短基線原子炉ニュートリノ欠損(カムランドの基線を短くしたもの)

ダブルシヨウ(仏), ダヤベイ(中), リノ(韓)

$$\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$$

$$\Delta m^2 = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2, E = 4 \text{MeV} \rightarrow L = \text{約} 2 \text{km}$$

cf. ニュートリノ振動
の確率 \propto

$$\sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{(\Delta m^2 / \text{eV}^2) (L / \text{km})}{E / \text{GeV}} \right)$$

T2K (Tokai To Kamioka; 2009~、加速器ニュートリノ欠損)

● 第一段階 (2009年~)

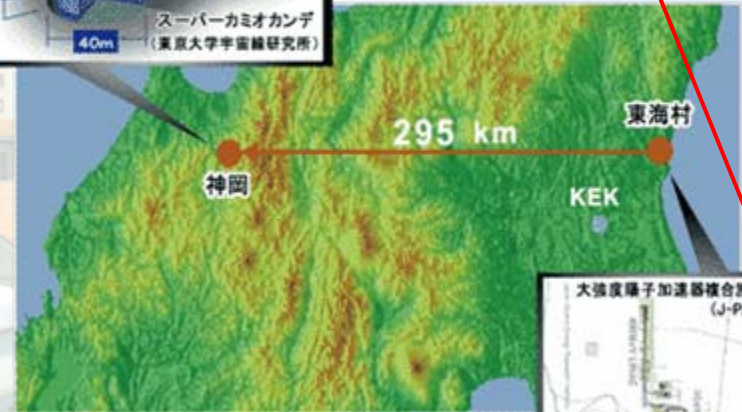
0.75MWのニュートリノビーム (JPARC)
⇒ SK (K2Kの50倍)

● K2Kの拡張版(イベント数を50倍にして精密実験)

● 牧・中川・坂田行列の未知の混合角 θ_{13} の値を測る



大強度陽子加速器複合施設 (JPARC)



$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{e}$ の発見

結果発表: 2011年6月15日

バックグラウンド1.5イベントが期待される所に6事象が観測された
→ $\theta_{13}=0$ は99.3%の確率で排除



小林隆



中家剛

ダブルショー(フランス・ショー; 2011年～、短基線原子炉ニュートリノ欠損)

結果発表: 2011年11月9日

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.086 \pm 0.051$$



ラセール



ダヤベイ(中国・大亜湾;2011年～、短基線原子炉ニュートリノ欠損)

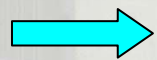
結果発表:2012年3月8日

誤差が一番小さい!

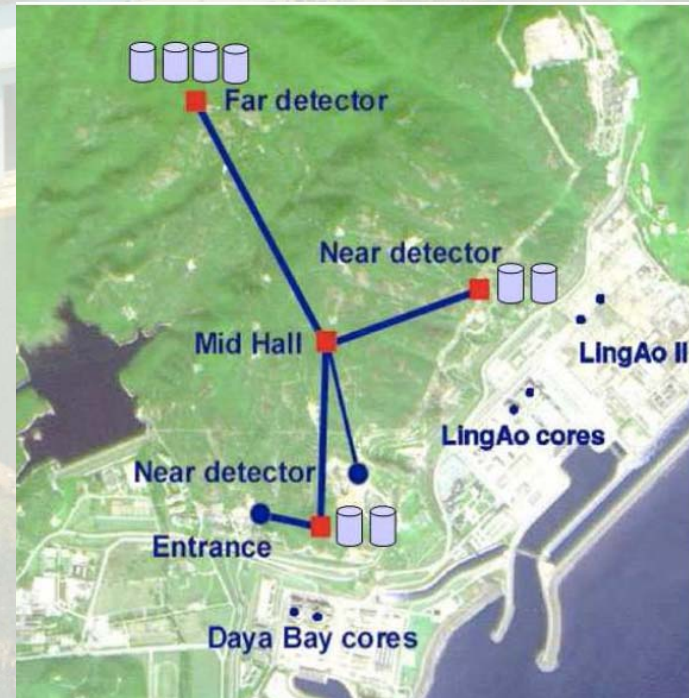
$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.017$$



Y.-F.ワン(王貽芳)



$\theta_{13} = 0$ を99.99998%で排除



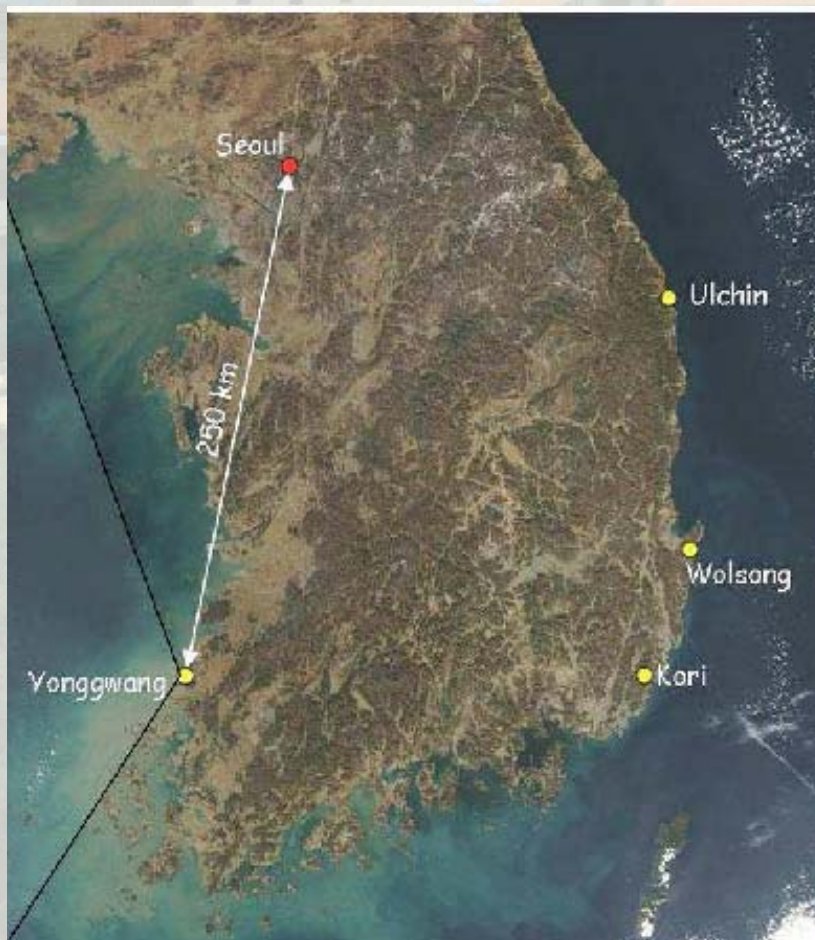
リノ(韓国・ヨンガン;2011年～、短基線原子炉ニュートリノ欠損)

結果発表:2012年4月3日

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.113 \pm 0.030$$



S.-B.キム



これまでのニュートリノ振動実験のまとめ

- 太陽ニュートリノ・長基線原子炉ニュートリノ⇒

$$\Delta m_{21}^2 = 8 \times 10^{-5} \text{eV}^2; \theta_{12} \cong 30^\circ$$

が決定された

- 大気ニュートリノ・加速器ニュートリノ⇒

$$|\Delta m_{32}^2| = 3 \times 10^{-3} \text{eV}^2; \theta_{23} \cong 45^\circ$$

が決定された

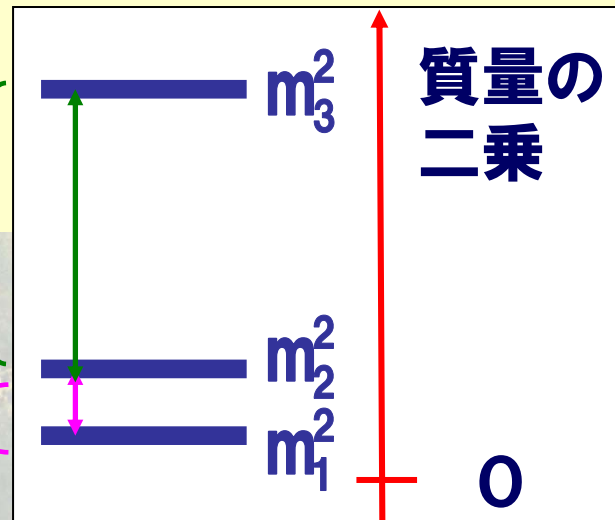
- 加速器ニュートリノ・短基線原子炉ニュートリノ欠損⇒

$$\theta_{13} \cong 9^\circ$$

が決定された

$$|\Delta m_{32}^2|$$

$$\Delta m_{21}^2$$



nobelprize.org



マクドナルド

nobelprize.org



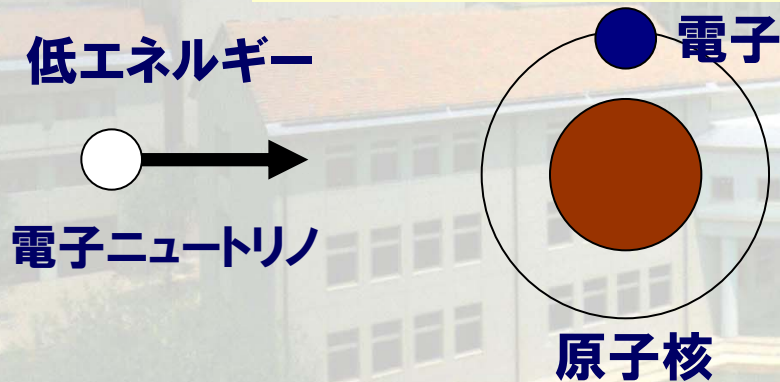
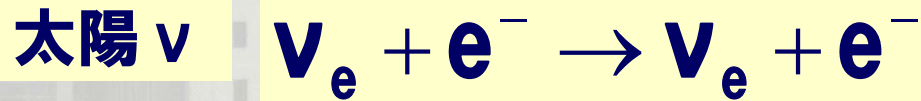
梶田隆章

An aerial photograph of a university campus. The central focus is a large, light-colored building with a prominent circular section supported by columns, situated on a hillside overlooking a large, irregularly shaped pond. The pond is surrounded by greenery and a winding path. In the background, several other multi-story buildings with red-tiled roofs are visible under a blue sky with scattered clouds. A semi-transparent yellow rectangular box is overlaid on the central building, containing the Japanese characters '付録' (Appendix) in a bold, dark blue font.

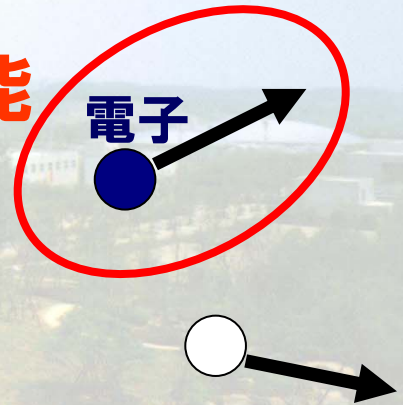
付録

ニュートリノの観測の原理

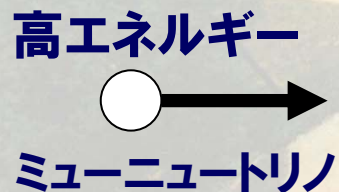
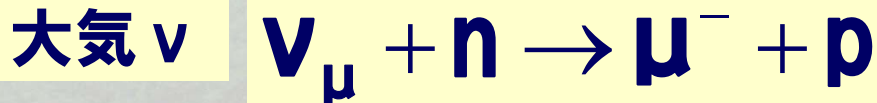
- ニュートリノは弱い力しか感じないので、弱い力を通してニュートリノと相互作用を起こした荷電粒子を観測する
- 標的の数を増大する(コストの削減→標的:水など経済的な物質)



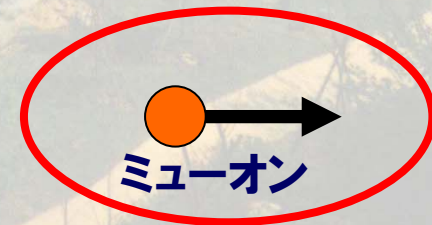
観測可能



ニュートリノのエネルギーの高低により主な反応の種類が異なる

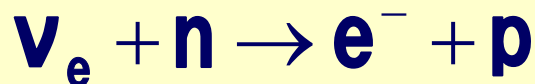


観測可能

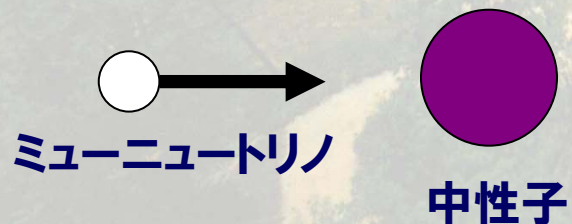
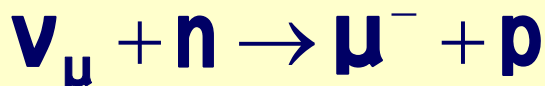
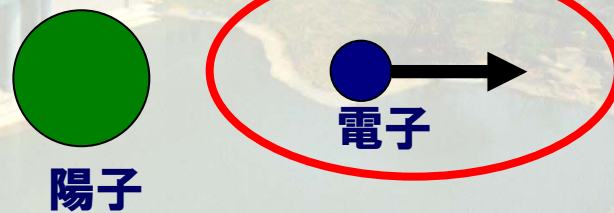


ニュートリノの種類の違い

元のニュートリノが電子型かミュー型かは生成される荷電粒子が電子かミューかで推測する (高エネルギーニュートリノの場合)



観測可能

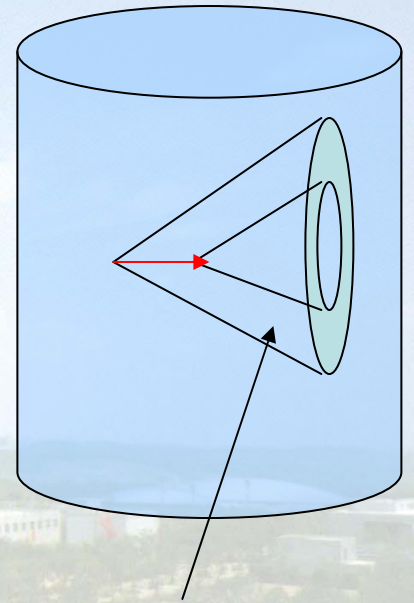


観測可能

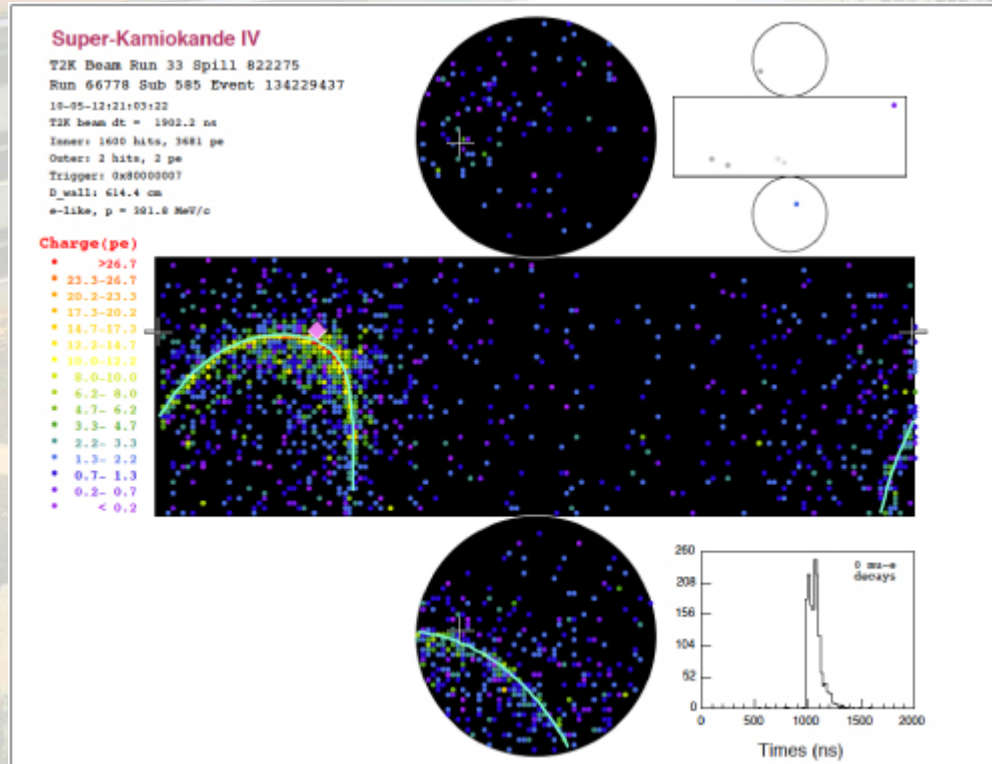


水による荷電粒子の観測の原理

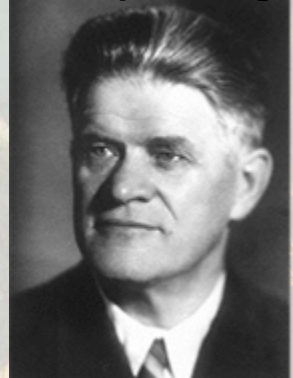
物質中では光の速度は真空中よりも遅くなる→
水中を走る荷電粒子は水中の光速度以上で運動する時に**チェレンコフ光**と呼ばれる光を放つ
(衝撃波の一種)→その光を光電子増倍管で観測する。
←スーパーカミオカンデ、SNO



チェレンコフ光



nobelprize.org



チェレンコフ

液体シンチレーター(ある種の油; $(\text{CH}_2)_n$)による荷電粒子の観測の原理

- 液体シンチレーターの中を荷電粒子が通過すると原子中の電子が一時励起され、また元の状態に落ちる際に光を発する。
←カムランド

